

# Control de sistemas con retardo usando el predictor de Smith



Sebastián Arbeláez López

# Control de sistemas con retardo usando el predictor de Smith

Sebastián Arbeláez López

Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Pereira, Agosto de 2017  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
Programa de Ingeniería Eléctrica.



Control de sistemas con retardo usando el predictor de Smith  
© Sebastián Arbeláez López

Director: Didier Giraldo Buitrago  
Docente de la Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, Agosto de 2017  
Programa de Ingeniería Eléctrica.  
Universidad Tecnológica de Pereira  
La Julita. Pereira(Colombia)  
TEL: (+57)(6)3137122  
*www.utp.edu.co*  
Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

# Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a Dios y a mi familia por guiarme hacia el camino correcto y aportarme la fortaleza y la esperanza necesaria en todo este proceso de formación profesional, a ellos mi gratitud total.

# Agradecimientos

A mi hermana, madre y amigos, en especial a los que estuvieron atentos y me proporcionaron su ayuda en los diferentes avances de esta trayectoria sobre todo en los momentos más difíciles. A los profesores de la facultad principalmente los que guiaron la finalización de este proyecto de grado.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. General . . . . .	2
1.2.2. Especificos . . . . .	2
1.3. Estado del arte . . . . .	3
1.4. Estructura del trabajo de grado . . . . .	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Tiempo muerto . . . . .	4
2.2. Estabilidad . . . . .	5
2.3. Margen de fase . . . . .	6
2.4. Perturbaciones . . . . .	9
2.5. Controladores clásicos . . . . .	10
2.6. Formas de predicción o compensación . . . . .	12
2.6.1. Compensadores de tiempo muerto (DTC) . . . . .	12
2.6.2. Control predictivo basado en modelo (MPC) . . . . .	12
2.7. Predictor de Smith . . . . .	12
2.7.1. Deducción . . . . .	13
2.7.2. Perturbaciones . . . . .	17
2.7.3. Limitaciones . . . . .	18
2.7.4. Ventajas . . . . .	18
<b>3. Aplicación y resultados</b>	<b>20</b>
<b>4. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros</b>	<b>31</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Actualmente, la mayor parte de los controladores que se estudian y desarrollan son para sistemas o procesos que no poseen retardo o que tienen retardos tan pequeños que se pueden despreciar, es decir, se pueden considerar dentro de la constante de tiempo del sistema. Para procesos cuyos retardos son comparables con estas constantes de tiempo, las técnicas clásicas de control no son aplicables en forma directa.[10]

Los retardos, generalmente son producidos por el tiempo de transporte de energía o materia dentro del sistema. Otro origen de los retardos son las dinámicas de distintos elementos colocados a lo largo del proceso que, por efecto cascada se suman y generan entre la entrada y salida un retardo que puede ser considerable. Desde el punto de vista del control, se puede considerar un único retardo, que es la sumatoria de todos.[17][11]

En este proyecto se presenta una solución al problema del tiempo muerto que es conocida como “Predictor de Smith”. Esta solución permite utilizar técnicas ya conocidas para el diseño de controladores para sistemas sin retardo y adaptarlas a sistemas con retardo.

El “Principio de Smith” plantea como objetivo de diseño lograr que la respuesta del sistema con retardo, tenga las mismas características dinámicas del sistema sin retardo, por ejemplo, que tenga la misma respuesta a la entrada escalón, pero desplazada en el tiempo el valor del retardo.[15]

## 1.1. Justificación

Los sistemas con retardos temporales aparecen frecuentemente en aplicaciones prácticas de ingeniería de control. Estos deben ser considerados tanto en el análisis como en el diseño de controladores. De no ser tenidos en cuenta, la respuesta del sistema en bucle cerrado puede llegar a degradarse hasta la inestabilidad.[17]

Uno de los principales problemas de los controladores clásicos, como es el PID, es su comportamiento frente a plantas con un retardo considerable. Este retardo se puede deber a una distancia física entre el proceso y el lugar de medición de la variable, una demora en los actuadores o cualquier otra causa.[9] En general, la forma de solucionar este efecto es reducir la ganancia del controlador a los fines de poder esperar el resultado de la actuación luego del retardo. Si ajustamos un regulador para una planta con y sin retardo los parámetros serán completamente distintos. Es obvio que el comportamiento a lazo cerrado del proceso sin retardo será superior al de la planta equivalente con retardo. De aquí surge la principal idea de diseñar un regulador de modo tal que la planta con retardo tenga el mismo comportamiento que si no lo tuviera. Sin embargo, no es posible compensar el retardo ya que es intrínseco al proceso, pero sí se puede compensar su efecto sobre la realimentación.[6] La idea está basada en que, al conocer el retardo, es posible saber qué es lo que sucederá luego del mismo, es decir podemos predecir el comportamiento del proceso.[20]

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. General

Diseñar controladores para sistemas con tiempos de retardo usando el predictor de Smith

### 1.2.2. Especificos

- Analizar sistemas físicos con retardo.
- Diseñar controladores clásicos y utilizarlos en sistemas con retardo.
- Diseñar controladores usando el Predictor de Smith.
- Realizar una comparación entre los controladores clásicos y controladores diseñados a partir del predictor de Smith para sistemas con retardo.



- Simular los anteriores sistemas y observar su respuesta

### 1.3. Estado del arte

En 1957 el norteamericano Otto Smith sugirió un compensador que remueve efectivamente el retardo de la ecuación característica del sistema, ese compensador de tiempo muerto fue conocido como el predictor de Smith (SP, por sus siglas en inglés) y fue la base de diversos estudios que actualmente se vienen desarrollando para tratar los problemas del retardo, por lo que se puede decir que Otto Smith fue el padre o pionero de la línea de investigación de los compensadores de tiempo muerto. El SP fue el primer controlador predictivo que surgió en la teoría del control el cual utiliza una técnica de predicción muy básica.[2]

### 1.4. Estructura del trabajo de grado

El contenido del trabajo de grado inicia con las descripciones previas de la información involucrada en el mismo, como es introducción, justificación, objetivos y estado del arte, continua con el marco teórico en el cual se explican algunos conceptos básicos de los sistemas de control para luego estudiar detalladamente la técnica de predicción conocida como el predictor de Smith, su estructura, modelo matemático, ventajas y desventajas. Posteriormente se presenta la metodología con la que se desarrollarán los problemas planteados. Luego se aplica esta estructura a algunos modelos de sistemas físicos, se analizan diferentes aspectos del SP. Finalmente se presentan unas conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros con base en los resultados obtenidos.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Tiempo muerto

La mayoría de los procesos industriales presentan atrasos en sus dinámicas. Ejemplos típicos en la industria son las columnas de destilación y los evaporadores e intercambiadores de calor. El retardo es un fenómeno que transcurre por el desplazamiento temporal que puede aparecer entre dos o mas variables de control y este puede ser generado por ejemplo por el tiempo necesario para transportar masa, energía o información.[2][15]

El tiempo muerto o retardo tambien se puede deber a la suma de todos los pequeños retardos que puedan adicionar los elementos de medición presentes en el sistema.[17][16]

En ocasiones, el tiempo muerto puede solucionarse reubicando los elementos de medición o utilizando dispositivos de respuesta más rápidos, otras veces se vuelve un problema permanente, lo que hace que se se deba acudir a la ejecución de un compensador.[15]

Los tiempos muertos producen un aumento en el retardo de fase del sistema, una disminución en la ganancia de fase y por tanto una limitación en las ganancias del controlador y la velocidad de respuesta en bucle cerrado.[12]

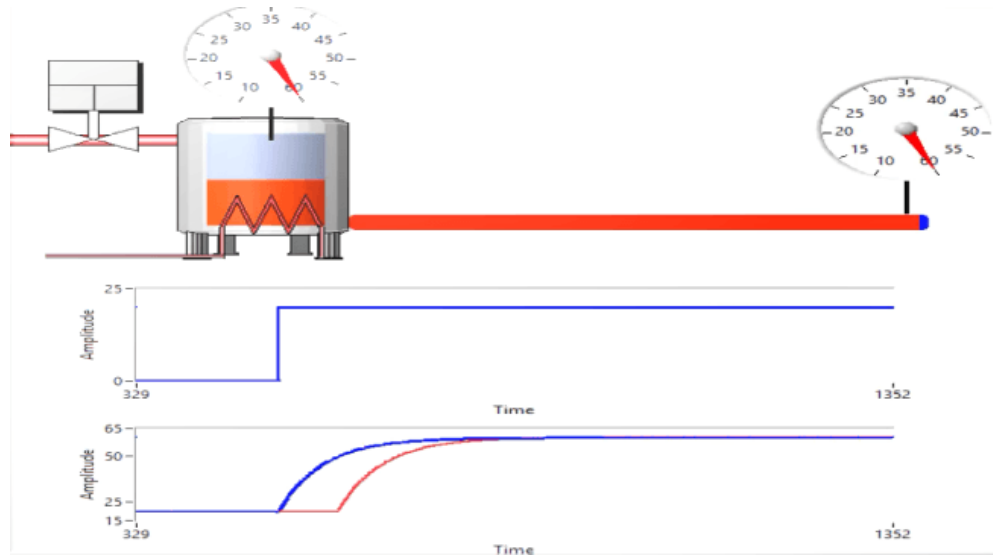


Figura 2.1: Tiempo muerto [2]

## 2.2. Estabilidad

La estabilidad es la especificación mas importante de un sistema, debido a que no podemos diseñar un sistema inestable para un requerimiento específico de respuesta transitoria o de error de estado estable. El sistema es estable si todas las frecuencias naturales están en el semiplano complejo izquierdo (Figura 2.2).[4][17][1]

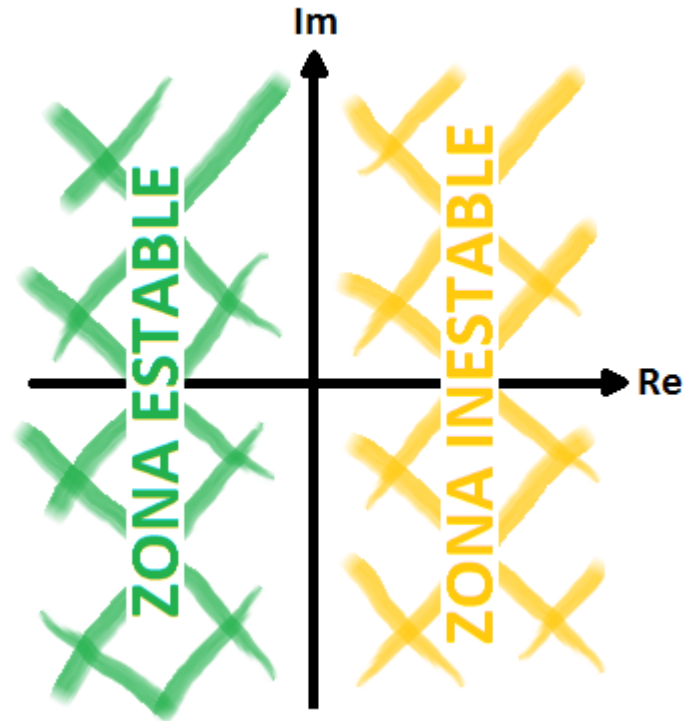


Figura 2.2: Plano de estabilidad

### 2.3. Margen de fase

El margen de fase es la cantidad de retardo de fase adicional en la frecuencia de cruce de ganancia requerida para llevar el sistema al borde de la inestabilidad. La frecuencia de cruce de ganancia es la frecuencia en la cual  $G(j\omega)$ , magnitud de la función de transferencia en lazo abierto, es unitaria. El margen de fase es de  $180^\circ$  más el ángulo de fase de la función de transferencia en lazo abierto en la frecuencia de cruce de ganancia <sup>1</sup>. [13]

---

<sup>1</sup>Definición válida para sistemas estables

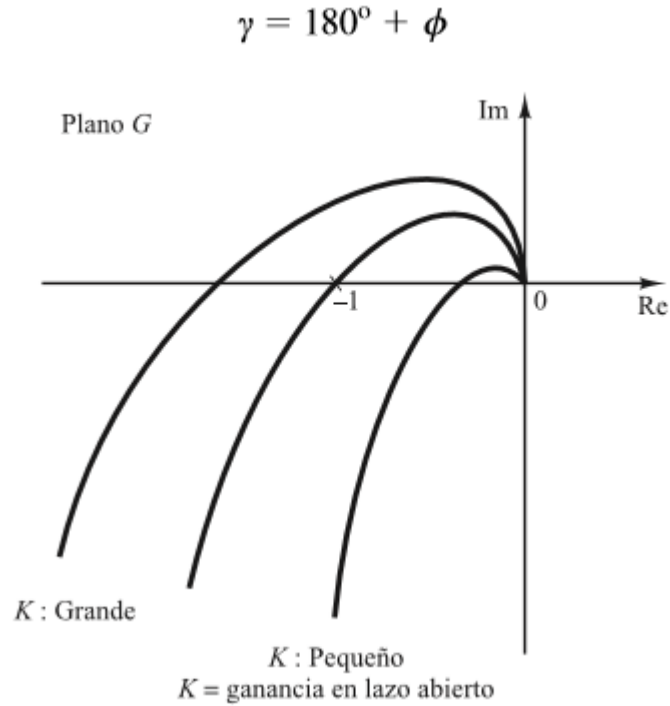


Figura 2.3: Diagramas polares

La Figura 2.4 (a), (b) y (c) ilustran el margen de fase de un sistema estable y de un sistema inestable en diagramas de Bode, diagramas polares y diagramas de magnitud logarítmica con respecto a la fase. En el diagrama polar, se dibuja una línea del origen al punto en el que el círculo cruza el lugar geométrico  $G(j\omega)$ . El ángulo del eje real negativo para esta línea es el margen de fase. Este es positivo para  $\gamma > 0$  y negativo para  $\gamma < 0$ . Con el fin de que un sistema de fase mínima sea estable, el margen de fase debe ser positivo. En los diagramas logarítmicos, el punto crítico en el plano complejo corresponde a las líneas 0 dB y  $180^\circ$ .

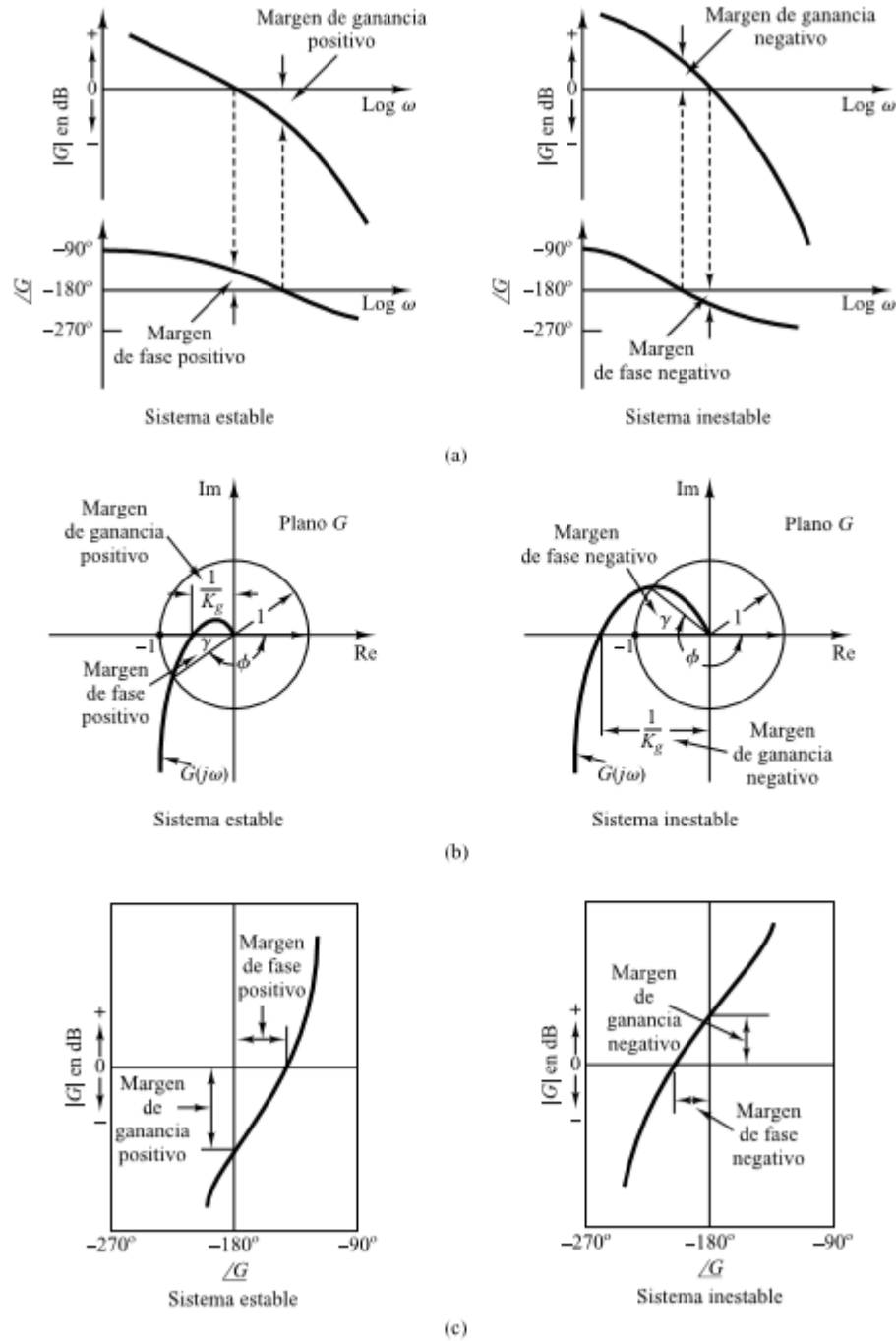


Figura 2.4: Márgenes de fase y de ganancia de sistemas estables e inestables. (a) Diagramas de Bode; (b) diagramas polares; (c) diagramas de magnitud logarítmica con respecto a la fase.

Los tiempos muertos o retardos presentes en un sistema reducen el margen de fase lo que implica que dicho sistema pueda llegar a volverse oscilatorio e inestable.[19]

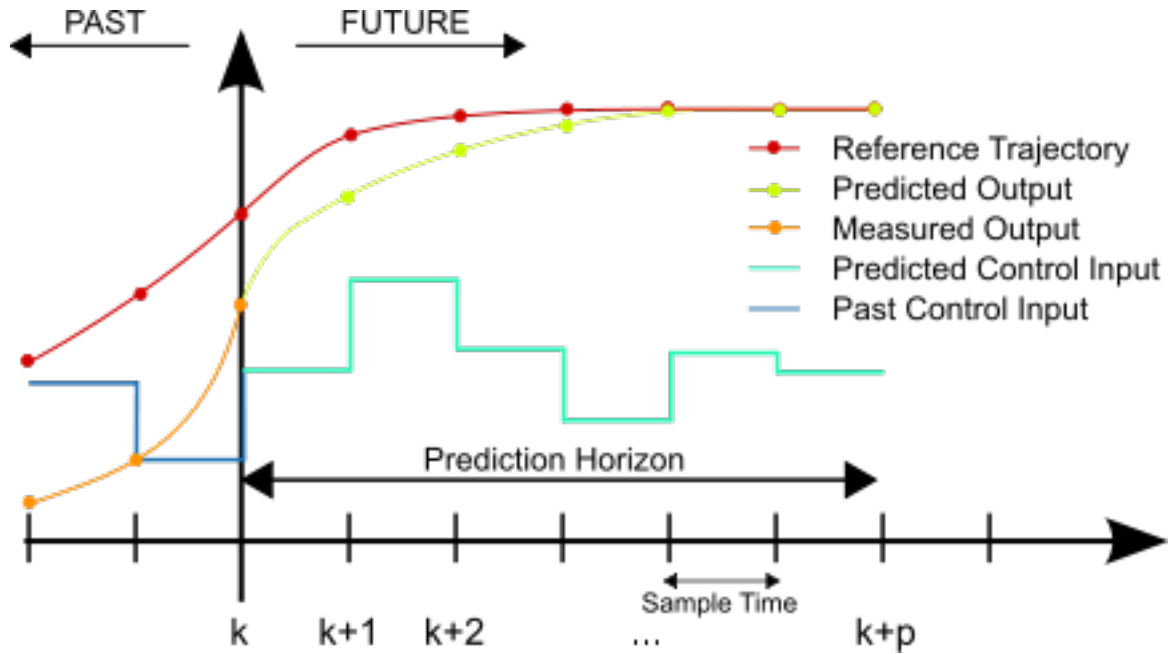


Figura 2.5: Diagrama de predicción

## 2.4. Perturbaciones

Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y se considera como una entrada.[13]

En un sistema de control las perturbaciones pueden deberse a factores externos por cambios en variables del medio como la temperatura, humedad, ruido, etc. Cuando la planta real presenta comportamientos dinámicos no modelados y/o se encuentra sometida al efecto de perturbaciones externas medibles y no medibles, la efectividad del Predictor de Smith disminuye.[8]

## 2.5. Controladores clásicos

Dentro de los controladores clásicos examinamos una particular estructura de control que es casi universalmente utilizada en la industria. Se trata de la familia de controladores de estructura fija llamada familia de controladores PID. Estos controladores han mostrado ser robustos y extremadamente beneficiosos en el control de muchas aplicaciones de importancia en la industria. Sin embargo cuando se presentan retardos de tiempo en la señal de control pierden robustez, efectividad y se vuelven vulnerables ante dinámicas o cambios en el sistema.[3] Se debe recurrir entonces a la implementación de métodos de predicción para que corrijan este problema. [9][4][18]

A continuación se presentan algunos controladores clásicos utilizados a menudo en procesos industriales con el objetivo de analizar previamente el comportamiento de los sistemas que presentan retardos, con y sin el método de predicción (Predictor de Smith).

### ■ PD

Por lo general, una gran pendiente en el error ( $e(t)$ ) en un sistema lineal correspondiente a una entrada escalón considerable produce un gran sobreimpulso en la variable controlada. El control derivativo mide la pendiente instantánea de  $e(t)$ , prediciendo que tan grande será el sobreimpulso aplicando las correcciones apropiadas antes de que se presente ese sobreimpulso.[14][4][7] La función de transferencia del control PD es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \cdot (1 + T_V) \cdot s \quad (2.1)$$

Donde  $T_v$  se denomina duración predicha.

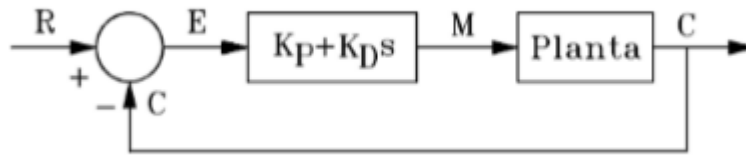


Figura 2.6: Diagrama de bloques para un controlador PD [4]



### ■ PI

El aspecto integral le da inteligencia al controlador ya que la mayoría de los procesos no pueden trabajar con desviación, éste logra que el sistema trabaje en el punto de control.[14][4] El valor de salida de  $K_P$  (controlador proporcional) varía en razón proporcional al tiempo en que ha permanecido el error y la magnitud del mismo, su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s}\right) \quad (2.2)$$

Donde  $K_P$  es la ganancia proporcional y  $T_N$  se denomina tiempo de acción integral. Ambos valores son ajustables. El tiempo integral regula la velocidad de acción de control, mientras que una modificación en  $K_P$  afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional de la acción de control.[14]

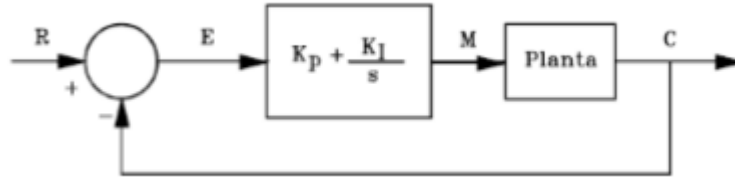


Figura 2.7: Diagrama de bloques para un controlador PI [4]

### ■ PID

Esta combinación tiene la ventaja de que cada una de las tres acciones de control son individuales. En este controlador la variación del parámetro  $T_v$  determina la anticipación del sistema a cambios, sin embargo se debe tener cuidado, pues una mala sintonización de este parámetro puede agregar ruido a la salida.[7][14] La función de transferencia está dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + T_V \cdot s\right) \quad (2.3)$$

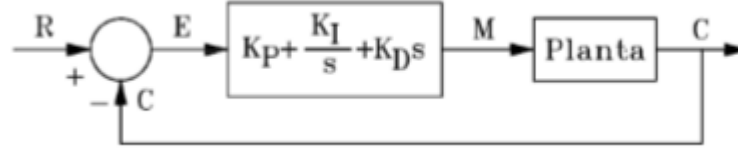


Figura 2.8: Diagrama de bloques para un controlador PID [4]

## 2.6. Formas de predicción o compensación

### 2.6.1. Compensadores de tiempo muerto (DTC)

Esta técnica utiliza la representación matemática del proceso para poder compensar el atraso o retardo presentado en el sistema. Dentro de esta forma de compensación se encaja el Predictor de Smith [2].

### 2.6.2. Control predictivo basado en modelo (MPC)

Utiliza una técnica donde se calcula en cada instante de tiempo la ley de control a través de un algoritmo de optimización. Es un método avanzado de control de procesos que ha sido utilizado por la industria de procesos en plantas químicas y refinerías de petróleo desde la década de 1980. En años recientes también ha sido utilizado en modelos de estabilidad para sistemas de potencia. Los controladores para este tipo de control dependen de modelos dinámicos del proceso en cuestión, más a menudo modelos lineales empíricos obtenidos por identificación de sistemas. La ventaja principal del MPC es el hecho de que permite que la ranura de tiempo inmediata sea optimizada, mientras tiene en cuenta también las ranuras de tiempo futuras. Esto se consigue optimizando un horizonte de tiempo finito, pero implementando únicamente la ranura de tiempo actual. El MPC tiene la capacidad de anticipar acontecimientos futuros y tomar acciones de control consecuentemente. Los controladores PID y LQR no poseen esta característica de predicción.[2].

## 2.7. Predictor de Smith

La estructura del predictor de Smith (SP) viene dado por la siguiente representación de modelo interno:

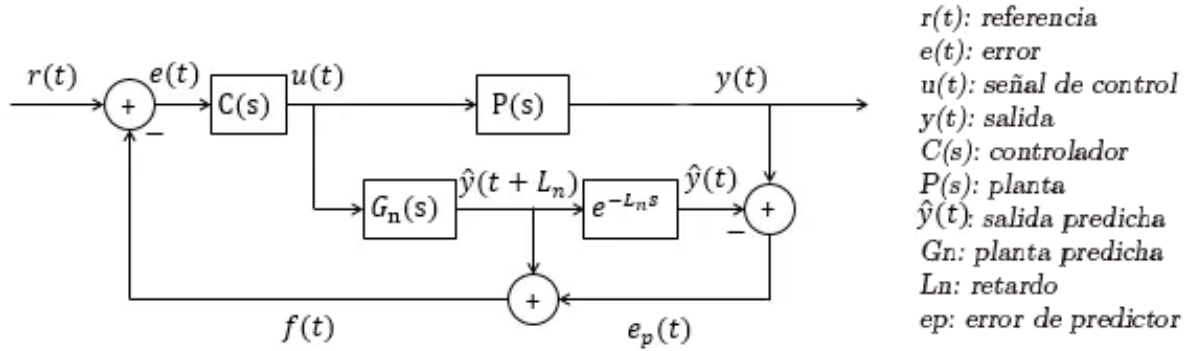


Figura 2.9: Estructura del SP [2]

### 2.7.1. Deducción

Para entender mejor el funcionamiento de la estructura del predictor de Smith se pretende realizar una deducción de ésta aplicando algebra de bloques como se muestra a continuación.

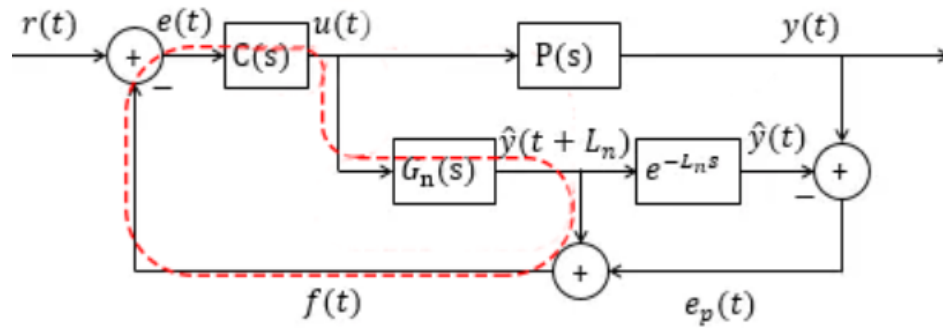


Figura 2.10: Estructura del SP[2]

Inicialmente se reduce el área marcada con rojo y se determina un equivalente de esta al cual llamaremos  $\tilde{C}$ .

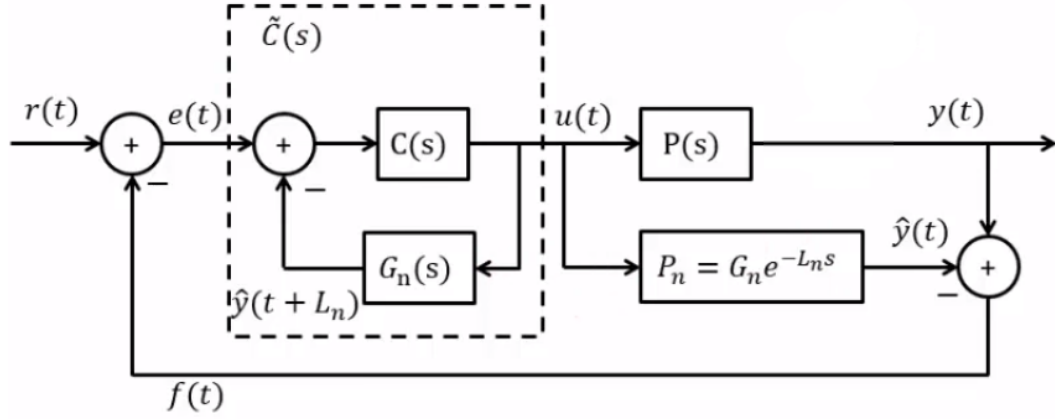


Figura 2.11: Estructura del SP [2]

Donde  $\tilde{C}$  se define como:

$$\tilde{C}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (2.4)$$

Así entonces queda la estructura reducida como se muestra a continuación.

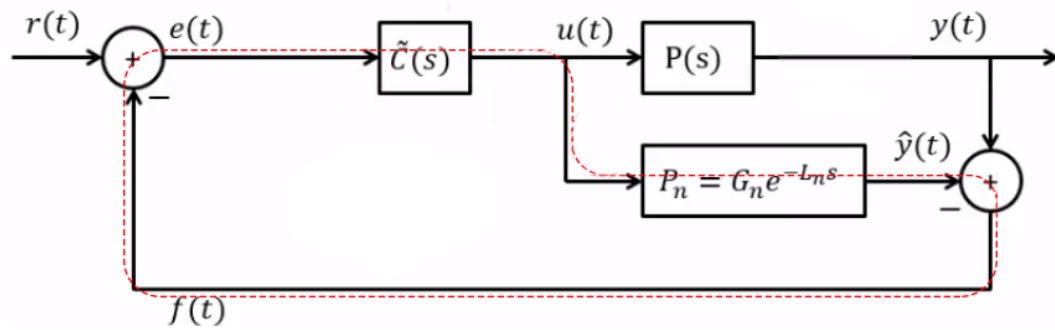


Figura 2.12: Estructura del SP [2]

De la misma manera se procede a reducir el área marcada con rojo y se obtiene un controlador equivalente como se muestra en la siguiente figura.

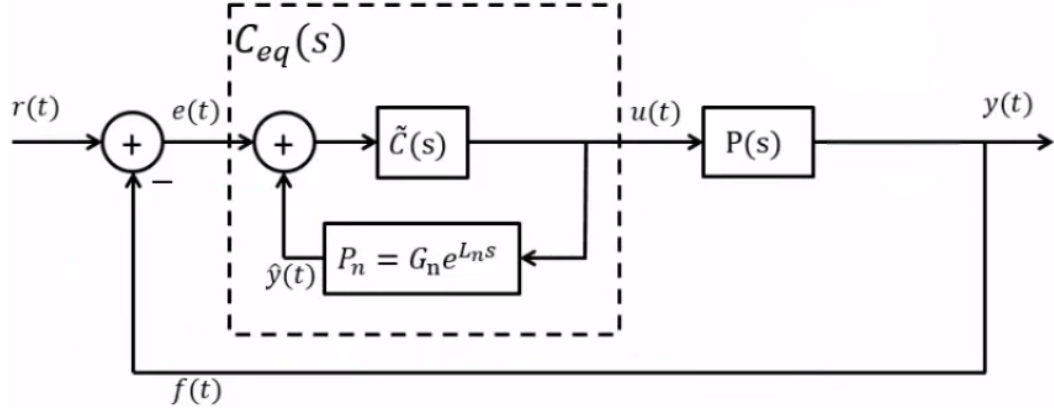


Figura 2.13: Estructura del SP [2]

Finalmente se obtiene el controlador equivalente al cual llamaremos  $C_{eq}$  que viene dado por la expresión:

$$C_{eq}(s) = \frac{\tilde{C}(s)}{1 + \tilde{C}(s)P_n(s)} \quad (2.5)$$

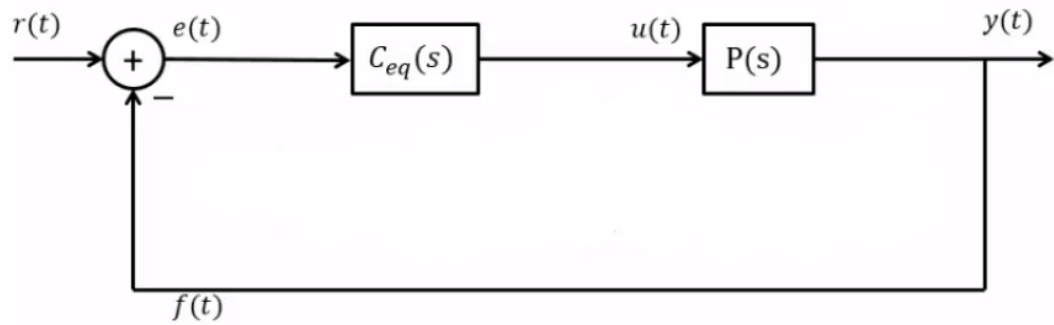


Figura 2.14: Estructura del SP reducida [2]

Ahora se pasa a reemplazar la variable  $\tilde{C}$  y posteriormente determinar la función de transferencia en lazo cerrado.

$$C_{eq}(s) = \frac{\tilde{C}(s)}{1 - \tilde{C}(s)P_n(s)} = \frac{\frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)}}{1 - \frac{C(s)}{1+C(s)G_n(s)}P_n(s)} \quad (2.6)$$

$$C_{eq}(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s)} \quad (2.7)$$

La función de transferencia en lazo cerrado esta dada por:

$$H_{LC}(s) = \frac{C_{eq}(s)P(s)}{1 + C_{eq}(s)P(s)} \quad (2.8)$$

Reemplazando  $C_{eq}$

$$H_{LC}(s) = \frac{\frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)P_n(s)}}{1 + \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)G_n(s)-C(s)P_n(s)}} \quad (2.9)$$

$$H_{LC}(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s) - C(s)P_n(s) + C(s)G_n(s)} \quad (2.10)$$

$$H_{LC}(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)[P(s) - P_n(s) + G_n(s)]} \quad (2.11)$$

De esta manera queda realizada la deducción del predictor de smith y ahora se puede realizar un análisis de la misma.

Se puede ver entonces que si  $P(s) = P_n(s)$  quiere decir que se tiene una representación exacta de la planta sin retardo y la función de transferencia quedaria de la siguiente manera:

$$H(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G_n(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G_n(s)} e^{-Ls} \quad (2.12)$$

### 2.7.2. Perturbaciones

Como se ha mencionado antes las perturbaciones afectan de manera directa al SP y pueden llegar a hacer que el proceso se vuelva inestable, a continuación se analizará el efecto de una perturbación sobre la estructura de control del Predictor de Smith.

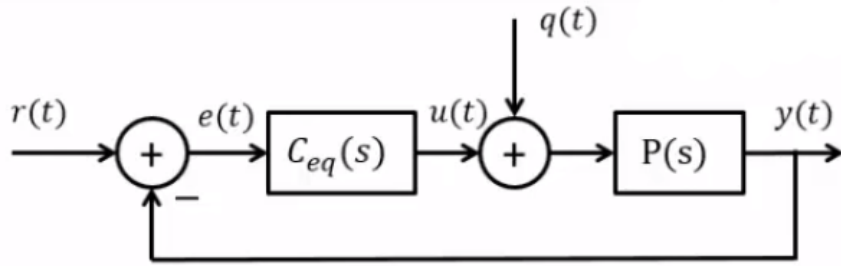


Figura 2.15: Análisis de perturbación en SP [2]

Se determina la función de transferencia correspondiente a la perturbación:

$$W(s) = \frac{y}{q} = \frac{P(s)}{1 + C_{eq}(s)P(s)} = \frac{P(s)}{1 + \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s)}} \quad (2.13)$$

$$W(s) = \frac{P(s)(1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s))}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s) + C(s)P(s)} \quad (2.14)$$

Si se sigue con la suposición de que  $P(s) = P_n(s)$ , entonces  $C(s)P(s) - C(s)P_n(s) = 0$

$$W(s) = \frac{P(s)(1 + C(s)G_n(s) - C(s)P(s))}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (2.15)$$

ahora se divide arriba y abajo por  $(1 + C(s)G_n(s))$  y queda de la siguiente manera.

$$W(s) = P(s) \left( 1 - \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \right) \quad (2.16)$$

Como se puede ver en la dinámica de la perturbación aparece por fuera de los paréntesis  $P(s)$  que hace referencia a la planta, lo que indica que si se trabaja con una planta lenta (cuyos polos son lentos), la perturbación se verá afectada y será rechazada según esta dinámica, además del tiempo de retardo que lleva implícita. de igual manera si se trabaja con una planta inestable la perturbación hará que el lazo de control se inestabilice. [2]

### 2.7.3. Limitaciones

- El predictor de Smith solo sirve para procesos estables.[18]
- La estructura NO es capaz de acelerar la dinámica de rechazo de perturbaciones.
- No se puede usar la estructura de el predictor de Smith en procesos integradores o en procesos inestables porque la estructura es internamente inestable, lo que quiere decir que si entra una perturbación, la estructura se inestabilizara para estos dos procesos.
- Pequeños errores de modelo, por ejemplo cuando  $P(s)$  es diferente a  $P_n(s)$ , puede hacer que la estructura entre rápidamente a la inestabilidad.[5]

Estas limitaciones han sido tema de estudio a lo largo de la historia y se han propuesto diferentes modificaciones con el objetivo de eliminarlas, entre las más conocidas se encuentra el SP filtrado, El SP de Astrom, entre otras.[2][12][11]

### 2.7.4. Ventajas

El predictor de Smith ofrece muchas ventajas sobre los sistemas que presentan grandes retardos pues su objetivo es lograr que la respuesta del sistema con retardo, tenga las mismas características del sistema sin retardo.[11][5] A continuación se listan algunas de las ventajas que presenta el SP.

- Elimina de la ecuación característica el retardo de tiempo.[19][5]



- Anticipa la señal de salida del modelo rápido de la señal de salida de la planta real en un tiempo  $L_n$ .
- Factoriza el comportamiento dinámico de la planta de forma implícita en  $G(s)$  (planta sin retardo) y  $e^{-Lns}$  (retardo)
- La estructura del SP puede ser fácilmente sometida a modificaciones para mejorar su efectividad frente a las perturbaciones.[5]
- Para algunos sistemas el SP puede presentar errores de predicción en la planta o en el tiempo de retardo.

## Capítulo 3

### Aplicación y resultados

Se proponen 2 procesos diferentes a los cuales se les aplica técnicas de control clásicas y se someten a un tiempo de retardo. se analizan los comportamientos que presentan ante la variación de este tiempo y posteriormente se les agrega la estructura del predictor de Smith. A continuación se muestra el comportamiento que presenta ante errores en el modelado y limitaciones del SP, finalmente se realiza una comparación entre los resultados y se realizan las respectivas conclusiones.

Para la verificación del SP se estudian los siguientes procesos y con cada uno de ellos se pretende mostrar diferentes aspectos que presenta esta técnica de predicción.

- Inicialmente se tiene un sistema térmico cuya figura y función de transferencia se muestran a continuación:

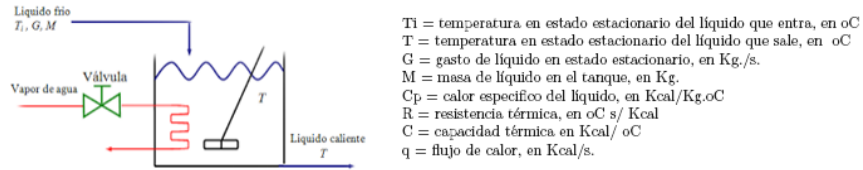


Figura 3.1: Sistema térmico[13]

Donde:

$$q_o = GC_p T \quad (3.1)$$

$$C = MC_p \quad (3.2)$$

$$R = \frac{T}{q_o} = \frac{1}{GC_p} \quad (3.3)$$

La función que determina la temperatura de salida correspondiente al sistema térmico es la siguiente:

$$T(s) = \frac{R}{RCs + 1}Q_i(s) + \frac{1}{RCs + 1}T_i(s) \quad (3.4)$$

Si se considera que la temperatura del fluido que entra se mantiene constante la función quedaria de la siguiente manera:

$$T(s) = \frac{R}{RCs + 1}Q_i(s) \quad (3.5)$$

Para este caso se tomarán los siguientes valores de las constantes

$$M = 10Kg, Cp = 1Kcal/Kg^{\circ}C, G = 1Kg/s$$

Por lo tanto  $C = 10Kcal/^{\circ}C$  y  $R = 1^{\circ}Cs/Kcal$

$$T(s) = \frac{1}{10s + 1}Q_i(s) \quad (3.6)$$

En la figura 3.2 se muestra en conjunto el diagrama de bloques del sistema térmico con y sin retardo cuando se le aplica un controlador PI y posteriormente la gráfica con el resultado obtenido (Figura 3.3).

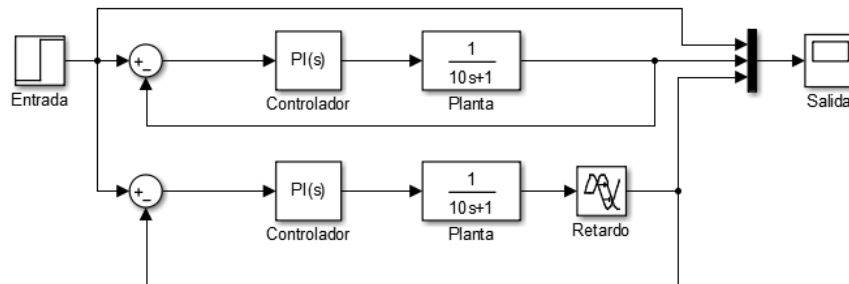


Figura 3.2: Diagrama de bloques del sistema térmico

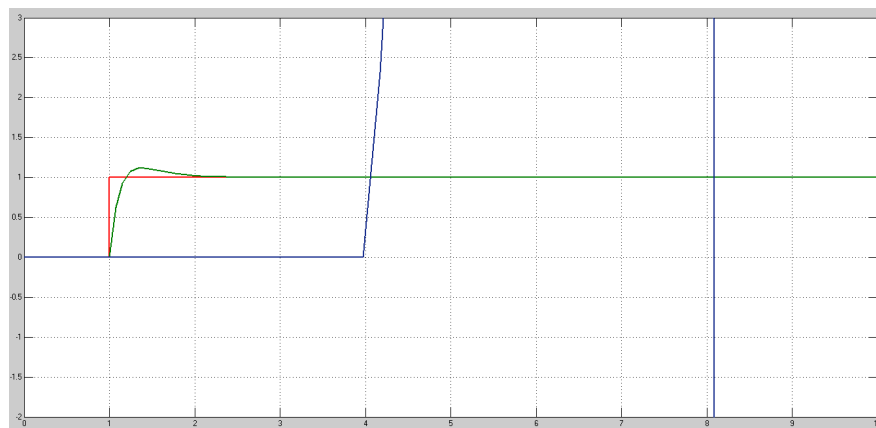


Figura 3.3: Gráfica del proceso con y sin retardo

En la anterior figura se puede apreciar, según la gráfica azul, la inestabilidad que presenta el sistema al inducir un retardo. la gráfica verde presenta el control del sistema cuando no se tiene retardo y la roja es la referencia. Ahora se introduce la estructura del SP y se visualiza su comportamiento.

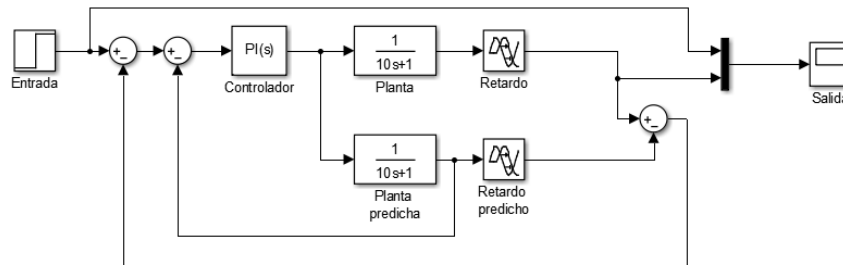


Figura 3.4: Diagrama de bloques del sistema térmico con SP

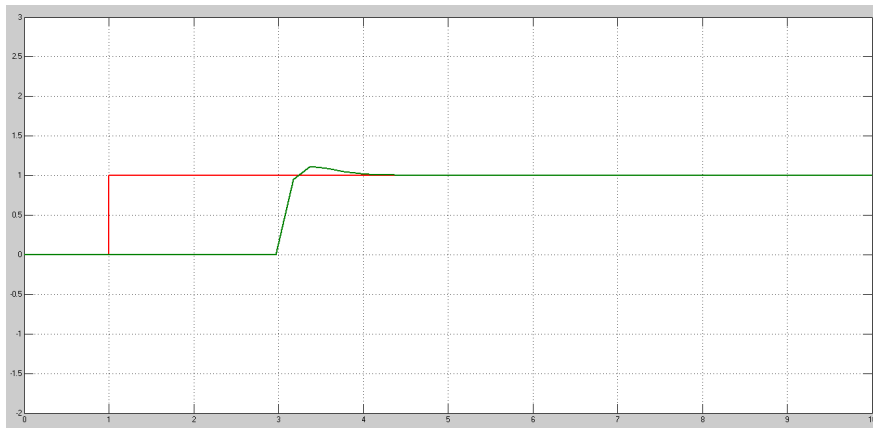


Figura 3.5: Gráfica del proceso con SP

La figura 3.5 permite visualizar el comportamiento del sistema cuando se aplica la estructura del predictor de Smith, dicho comportamiento es exactamente igual al del sistema sin retardo pero desplazado el tiempo muerto, lo que ocurre cuando se tiene una predicción exacta de la planta y el retardo.

Ahora se procede a analizar la respuesta ante perturbaciones las cuales se consideran como una de las limitaciones que presenta el predictor de smith (Figura 3.6)[5]

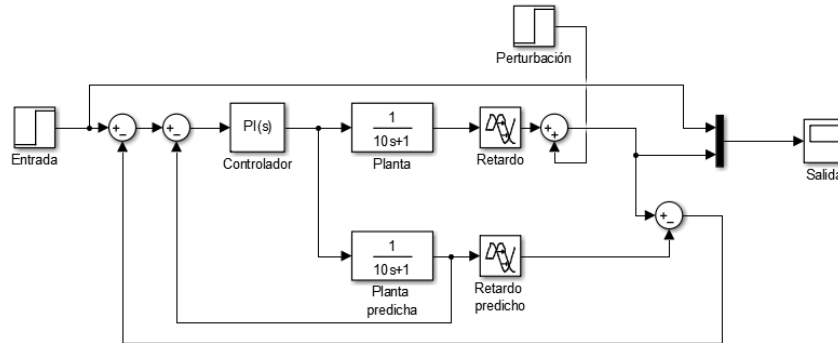


Figura 3.6: Diagrama de bloques del sistema térmico con SP y con perturbación

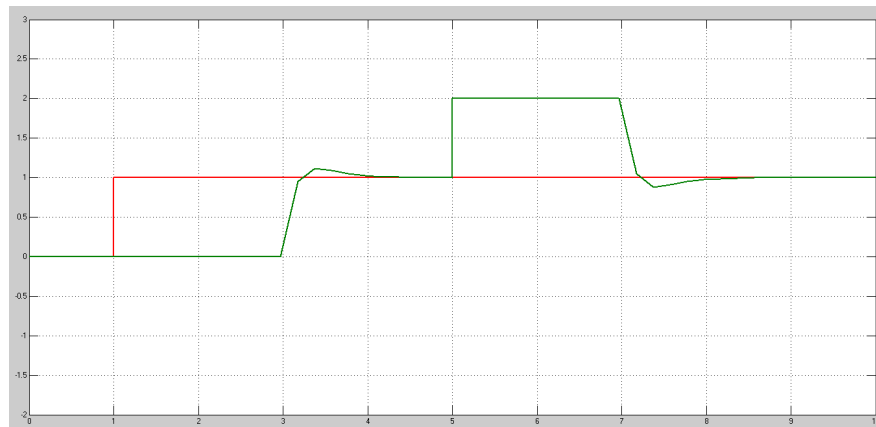


Figura 3.7: Gráfica del proceso con SP y perturbación

Se comprueba entonces, según la figura 3.7, el gran problema que se presenta cuando aparecen perturbaciones dentro de la estructura de control, pues la perturbación se ve afectada por el tiempo muerto el cual se suma al tiempo que toma en disipar ésta.

- Con el objetivo de visualizar el comportamiento del predictor de Smith cuando se tienen errores de predicción tanto en la planta como en el tiempo de retardo se propone el siguiente sistema, que corresponde a una planta hidráulica (Figura 3.8).

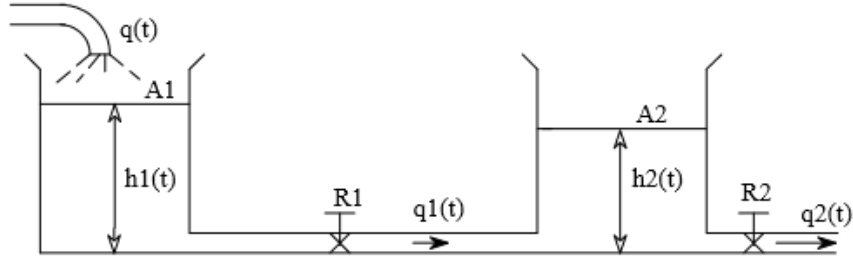


Figura 3.8: Planta Hidráulica [13]

Donde:  $A_1 = 2$ ,  $A_2 = 2$ ,  $R_1 = \frac{1}{3}$ ,  $R_2 = \frac{1}{4}$

La función de transferencia correspondiente al anterior sistema esta dada por:

$$H_s = \frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{R_2}{R_1 R_2 A_1 A_2 s^2 + (R_2 A_1 + A_1 R_1 + A_2 R_2)s + 1} \quad (3.7)$$

$$H_s = \frac{0,75}{s^2 + 5s + 3} \quad (3.8)$$

En la figura 3.10 se observa como se comporta el sistema sin retardo ante una entrada escalón unitario y controlado con un modelo PID previamente calculado.

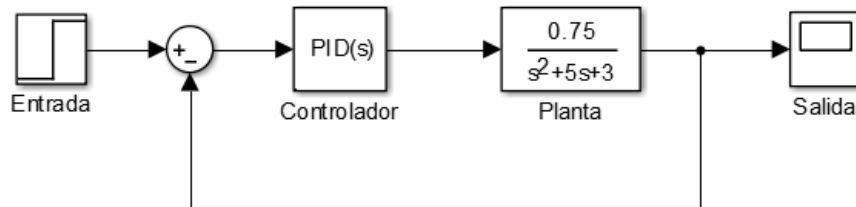


Figura 3.9: Control PID sobre planta hidráulica sin retardo

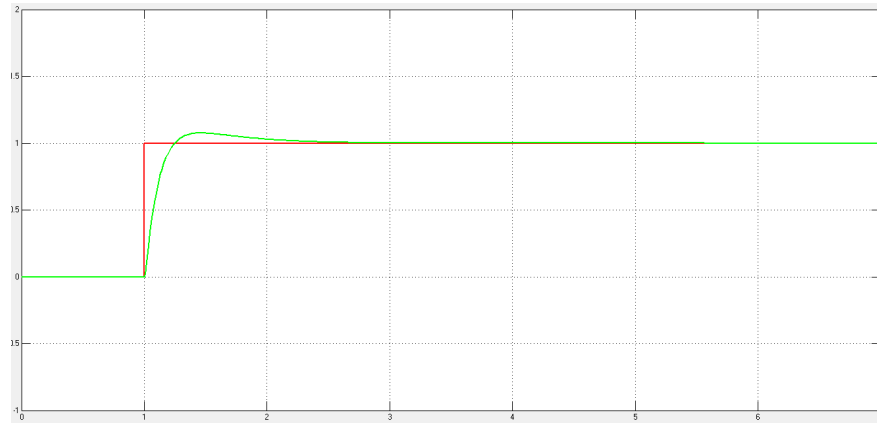


Figura 3.10: Señal de respuesta

A continuación se agrega un retardo de dos segundos al proceso mostrado anteriormente y se visualiza su comportamiento.

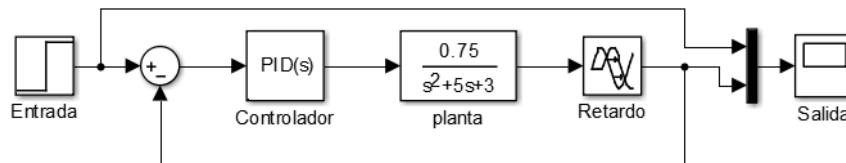


Figura 3.11: Control PID sobre planta hidráulica con retardo



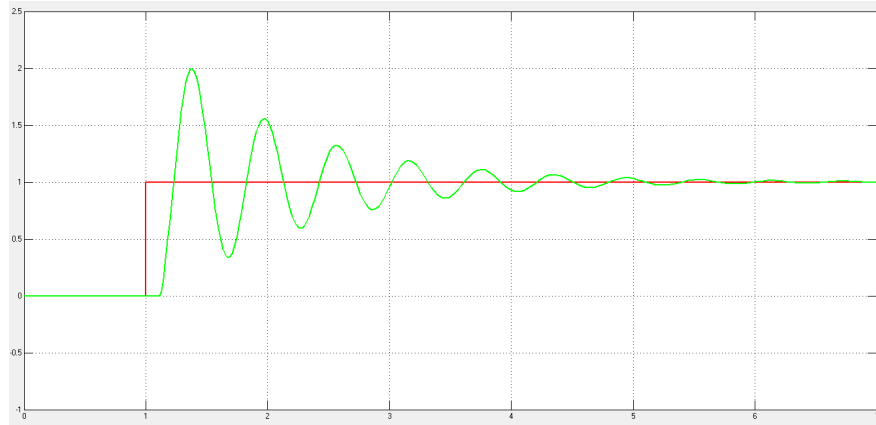


Figura 3.12: Señal de respuesta

Se puede ver como al agregar el retardo al proceso el controlador pierde efectividad, puesto que se vuelve más oscilatorio y que se demora más en alcanzar la referencia. Para eliminar este problema se adiciona la estructura del SP y se observa su comportamiento.

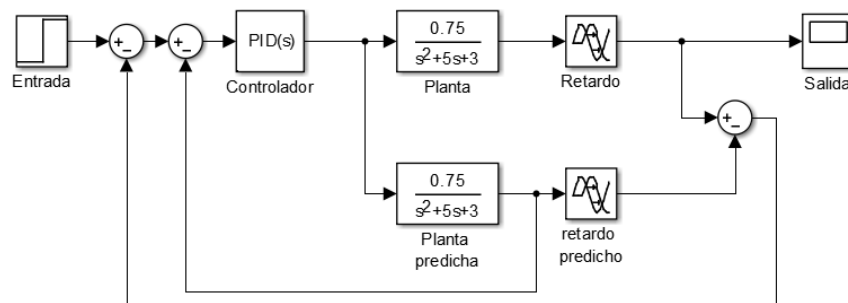


Figura 3.13: Control PID sobre planta hidráulica con retardo usando SP

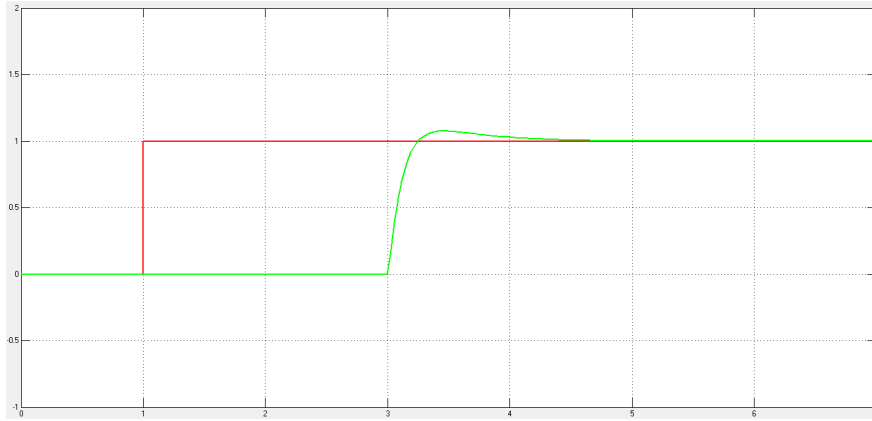


Figura 3.14: Señal de respuesta

Como se observa en la figura 3.14 la respuesta mejora en gran medida cuando se agrega el SP a la estructura de control.

Ahora se quiere analizar el comportamiento del sistema cuando se tiene un error del 10 % en la predicción del retardo.

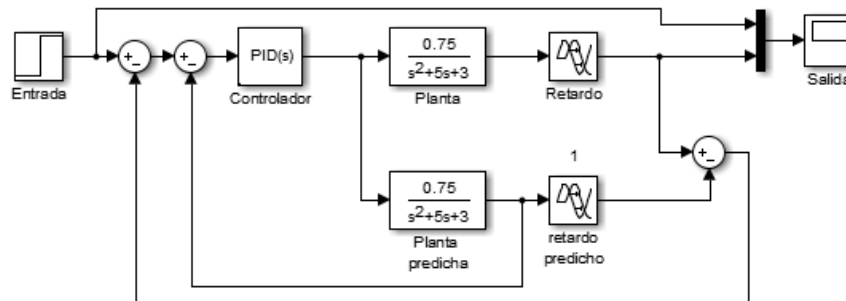


Figura 3.15: Control PID sobre planta hidráulica con error del 10 % en el retardo

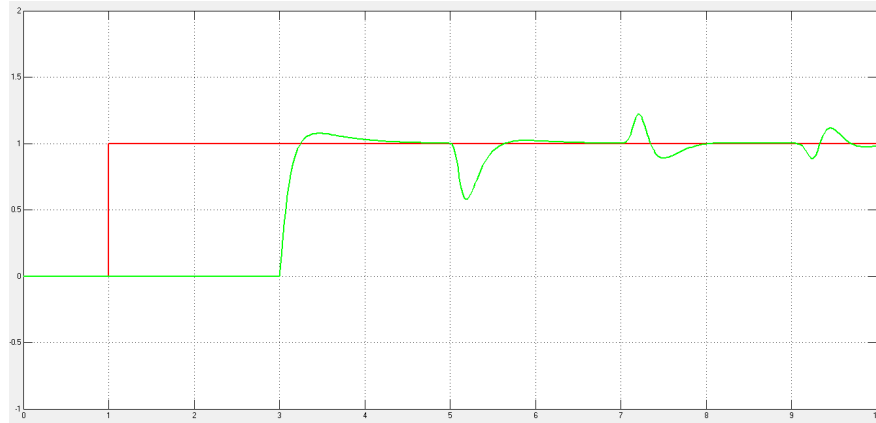


Figura 3.16: Señal de respuesta

Según se observa cuando se tiene un error en la predicción del tiempo de retardo la señal de respuesta toma mucho tiempo en alcanzar la estabilidad.

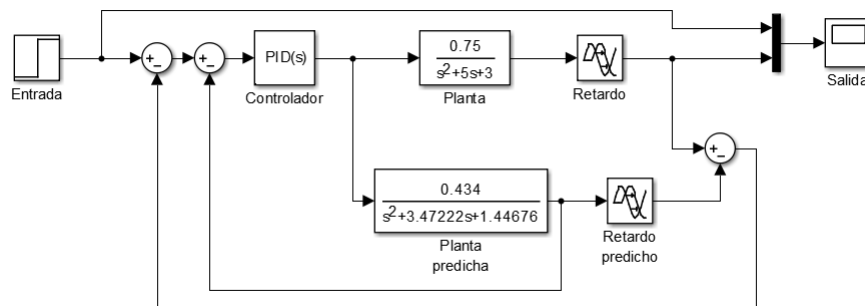


Figura 3.17: Control PID sobre planta hidráulica con error del 20 % en la planta

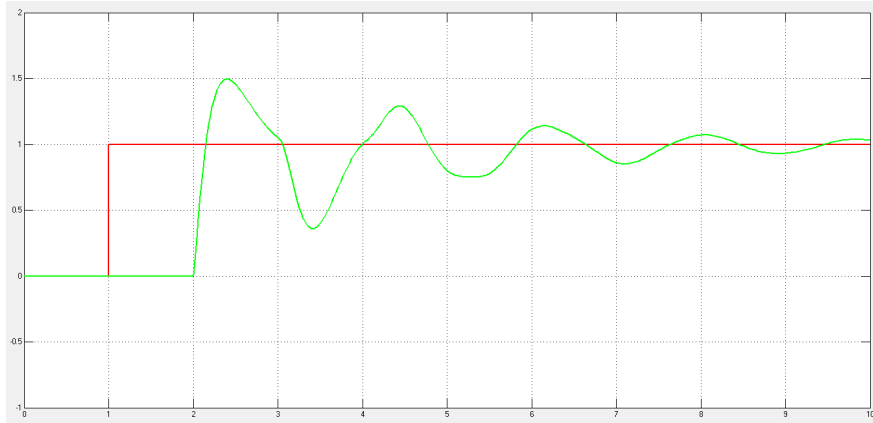


Figura 3.18: Señal de respuesta

Cuando hay errores en el modelado, la respuesta del sistema con Predictor de Smith se degrada (hay sobreimpulso y el tiempo de establecimiento es mayor) pero puede ser una respuesta aceptable. Esto se debe a que el PID es tolerante a variaciones en el proceso.

## Capítulo 4

# Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

El predictor de Smith es una muy buena técnica de predicción a la hora de trabajar sobre sistemas que presentan retardos muy grandes que pueden afectar la respuesta al punto de volver el proceso inestable, su efectividad radica en una buena estimación de la planta y el retardo.

Con base en los resultados obtenidos se observa que el tiempo de establecimiento que se logra en el sistema con retardo aplicando Predictor de Smith es mucho menor que cuando se ajusta un controlador clásico para el mismo sistema. El tiempo de establecimiento que se consigue con un Predictor de Smith es la suma de la respuesta del sistema sin retardo y el valor del retardo.

Cuando se presentan errores en el modelado, la respuesta del sistema con Predictor de Smith se degrada (hay sobreimpulso y el tiempo de establecimiento es mayor) pero puede ser una respuesta aceptable. Esto se debe a que el PID es tolerante a variaciones en el proceso. Cuando se cometen errores en el modelado del retardo, la respuesta del sistema es oscilante y tarda más en llegar a la referencia. Se puede decir entonces en forma general que es más importante tener un buen modelo del retardo que de la planta.

Se deben realizar modificaciones sobre el predictor de Smith para mejorar sus prestaciones y aumentar su robustez principalmente frente a la limitación que tiene en la respuesta ante perturbaciones.[3]

# Bibliografía

- [1] D. G. Buitrado and E. G. Suárez, *Sistemas dinámicos*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.
- [2] S. Castaño, “Predictor de smith,” [urlhttp://controlautomaticoeducacion.com/predictordesmith/](http://controlautomaticoeducacion.com/predictordesmith/), 2016.
- [3] C. Dong, J. Lu, and Q. Meng, “Position control of an electro-hydraulic servo system based on improved smith predictor,” in *Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference on*, vol. 6. IEEE, 2011, pp. 2818–2821.
- [4] D. Giraldo and E. Giraldo, “Teoría de control análogo,” *Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia*, 2009.
- [5] I. O. B. Gonzalez, R. R. Perez, V. F. Batlle, and F. J. C. Garcia, “Temperature control based on a modified smith predictor for injectable drug formulations,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 4, pp. 1041–1047, 2015.
- [6] S.-Z. He, F.-L. Xu, and S. Tan, “A new adaptive smith predictor controller,” in *TENCON’92. Technology Enabling Tomorrow: Computers, Communications and Automation towards the 21st Century. 1992 IEEE Region 10 International Conference*. IEEE, 1992, pp. 1038–1042.
- [7] P. J. Jiménez-Ceciliano, “Conceptos de controladores pid e implementación en un horno de fundición de acero,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 27, no. 8, pp. 31–40, 2014.
- [8] B. C. Kuo, *Sistemas de control automático*. Pearson Educación, 1996.
- [9] V. Mazzone, “Controladores pid,” *Quilmes: Universidad Nacional de Quilmes*, 2002.

- [10] J. E. Normey-Rico, *Control of dead-time processes*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [11] J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, “Dead-time compensators: A survey,” *Control engineering practice*, vol. 16, no. 4, pp. 407–428, 2008.
- [12] J. E. Normey-Rico, J. L. Guzman, S. Dormido, M. Berenguel, and E. F. Camacho, “An unified approach for dtc design using interactive tools,” *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 10, pp. 1234–1244, 2009.
- [13] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.
- [14] M. E. A. PÉREZ, V. H. B. BALTAZAR, J. H. P. RAMÍREZ, and F. M. VALLE, “Diseño de controladores p, pi y pid para el comportamiento dinámico de un servo-sistema hidráulico, basado en desarrollo experimental,” *Análisis y Simulación*, p. 13.
- [15] V. J. Poorani and L. V. Anand, “Comparison of pid controller and smith predictor controller for heat exchanger,” in *Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 217–221.
- [16] J. L. RODRIGUEZ VERDUZCO, “Análisis de los efectos de los tiempos de retardo en el funcionamiento de un control retroalimentado,” Ph.D. dissertation, 2010.
- [17] A. G. Sorribes and G. Gil, “Sistemas dinámicos con retardos temporales,” 2011.
- [18] S. Wang, B. Xu, Q. Wang, and Y.-H. Liu, “Modified smith predictor and controller for time-delay process with uncertainty,” in *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, vol. 1. IEEE, 2006, pp. 623–627.
- [19] C. Xia and G. Gao, “Brushless dc motors control based on smith predictor modified by fuzzy-pi controller,” in *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2008. FSKD’08. Fifth International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2008, pp. 289–293.
- [20] A. ZANINI, “El predictor de smith y el filtro de kalman: Ejemplos de predicción y estimación,” *Cuadernos Profesionales de AADECA, Argentina*, 2000.